

The Effect of Carbon Black on Some Biological Properties of Soil and Growth of Broad Bean in Lead-Contaminated Soil

Neda Maraghi ¹, Nafiseh Rangzan ², Naeimeh Enayatizamir^{3*}, Mohammad Reza Ansari⁴

(Received: January, 2025

Accepted: May, 2025)

Abstract

Soil contamination with heavy metals is highly significant due to its destructive and harmful effects on agricultural production and the nutrition of living organisms. Therefore, implementing management strategies to reduce their adverse effects is essential. This study investigated the effect of carbon black and lead contamination on selected biological properties of soil and the growth of broad bean plants. The pot experiment was carried out in a completely randomized factorial design with four replications, including two factors: lead contamination at three levels (no contamination, 50, and 100 mg/kg) and carbon black at four levels (0, 1, 2, and 4% by weight). The study was conducted in the greenhouse of Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. Results showed that lead contamination in soil decreased plant height and dry weight. As soil contamination increased, the concentration and uptake of lead in the roots and aerial parts of the plant also increased. The application of carbon black reduced the concentration of lead in the roots and aerial parts, with the highest reduction observed at the 4% carbon black level compared to the control. The addition of carbon black increased plant height, root dry weight, and aerial part dry weight by 22.86%, 18.01%, and 23.07%, respectively, compared to the control. The highest values of microbial biomass carbon, soil microbial respiration, and catalase enzyme activity were recorded in the treatment with 4% carbon black and no soil lead contamination, measuring 13.35 mgCmic100g⁻¹, 64.89 CO₂100g⁻¹.day⁻¹, and 1.82 mLKMnO₄g⁻¹.h⁻¹, respectively. The results of this study showed that the addition of carbon black reduced the harmful effects of lead and improved soil biological indices and plant growth. However, further research is necessary to assess the long-term effects.

Key words: Contamination, Lead, Respiration, Microbial Biomass Carbon, Plant.

Maraghi N., Rangzan N., Enayatizamir N., Ansari M.R. 2025. The effect of Carbon Black on Some Biological Properties of Soil and Growth of Broad Bean in Lead-Contaminated Soil. *Applied Soil Research*. 13(3): 49-62.

1, 2 & 4. Former MSc. Student, Associate professor and Assistant professor, Department of Soil Science, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran.

2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* Corresponding Author Email: n.enayatizamir@scu.ac.ir

اثر دوده کربن بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک و رشد گیاه باقلا در خاک آلوده به سرب

ندا مراقی^۱، نفیسه رنگ‌زن^۲، نعیمه عنایتی‌ضمیر^{۳*}، محمدرضا انصاری^۴

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹)

(تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰)

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین، به دلیل اثرات مخرب و زیان‌باری که بر تولیدات کشاورزی و تغذیه موجودات زنده می‌گذارند، بسیار حائز اهمیت است. لذا استفاده از راهکارهای مدیریتی برای کاهش اثرات مخرب آن‌ها ضروری است. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر دوده کربن و آلودگی سرب بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک و رشد گیاه باقلا صورت گرفت. آزمایش به صورت گلدانی با چهار تکرار به صورت فاکتوریل با دو فاکتور آلودگی سرب در سه سطح (بدون آلودگی، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و دوده کربن در چهار سطح (۰، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در گلخانه‌ای دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شد. نتایج نشان داد که آلودگی خاک به سرب موجب کاهش ارتفاع و وزن خشک گیاه شد. با افزایش سطح آلودگی خاک غلظت و جذب سرب در ریشه و اندام هوایی افزایش یافت. کاربرد دوده کربن موجب کاهش غلظت و جذب سرب در ریشه و اندام هوایی با بیشترین کاهش در سطح چهار درصد دوده کربن مشاهده شد. افزودن دوده کربن باعث افزایش ۲۲/۸۶، ۱۸/۰۱ و ۲۳/۰۷ درصدی ارتفاع گیاه، وزن خشک ریشه و اندام هوایی نسبت به شاهد شد. بیشترین مقدار کربن زیتوده میکروبی، تنفس میکروبی خاک و فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار چهار درصد دوده کربن و بدون آلودگی خاک به سرب به ترتیب با مقادیر $13/35 \text{ mg Cmic}100\text{g}^{-1}$ ، $64/89 \text{ mg CO}_2100\text{g}^{-1}.\text{day}^{-1}$ و $1/82 \text{ mLKMnO}_4 \text{ g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن دوده کربن توانست اثرات مخرب سرب را کاهش داده و شاخص‌های زیستی خاک و رشد گیاه را بهبود بخشد. با این حال، برای ارزیابی تأثیرات بلندمدت، انجام تحقیقات بیشتر ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، سرب، تنفس، کربن زیتوده میکروبی، گیاه.

مراقی ن.، رنگ‌زن ن.، عنایتی‌ضمیر ن.، انصاری م. ۱۴۰۴. اثر دوده کربن بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک و رشد گیاه باقلا در خاک آلوده به سرب. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۳، شماره ۳. صفحه: ۴۹-۶۲.

۱، ۲ و ۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

* پست الکترونیک: n.enayatzamir@scu.ac.ir

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین، به ویژه سرب، یک مشکل زیست‌محیطی جدی است که می‌تواند پیامدهای منفی بر سلامت انسان، حیوانات و گیاهان داشته باشد. فلز سنگین سرب به دلیل پایداری بالا در محیط، می‌تواند برای مدت طولانی در خاک باقی بماند و از طریق زنجیره غذایی وارد بدن موجودات زنده شود (Raj & Das, 2023). منابع آلودگی سرب می‌توانند طبیعی یا انسانی باشند. به طور طبیعی، سرب در نمونه‌های زمین‌شناسی وجود دارد که از طریق فوران‌های آتشفشانی وارد محیط می‌شود. حدود ۹۸ درصد از آلودگی سرب ناشی از چندین منبع انسانی است، از جمله رنگ‌ها، پالایشگاه‌های پتروشیمی، باتری‌های سربی، بنزین سریدار مورد استفاده در سوخت وسایل نقلیه، فرآیند ذوب سنگ معدن سرب، اسباب‌بازی‌ها، مواد سرمایی و صنعت کود، که به آلودگی اکوسیستم‌های خاکی و آبی منجر می‌شود (Gupta et al., 2024). این فلز باعث ایجاد اختلالات یادگیری و رفتاری در کودکان، صدمه به اندام‌های کبد، کلیه، قلب و اختلال سیستم ایمنی بدن در انسان می‌شود (Ara & Usmani, 2015).

آلودگی سرب در خاک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ریزجانداران خاک و سلامت خاک داشته باشد که به نوبه خود می‌تواند رشد گیاهان و عملکرد اکوسیستم را به طور منفی تحت تأثیر قرار دهد. سرب موجب اختلال در فرآیندهای سلولی و فعالیت‌های آنزیمی ریزجانداران مختلف خاک، از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها شده و منجر به کاهش تنوع، فعالیت و زیست‌توده میکروب‌ها می‌شود و در نتیجه چرخه مواد مغذی و تجزیه مواد آلی مختل می‌گردد (Sun et al., 2023; Gupta et al., 2024). این امر به نوبه خود منجر به تغییرات در ساختار خاک، ظرفیت نگهداری آب و دسترسی به مواد مغذی می‌شود و تأثیر منفی بر رشد گیاهان و عملکرد اکوسیستم خواهد داشت (Zulfiqar et al., 2019). ورود سرب به گیاهان از طریق ریشه و برگ صورت می‌گیرد. تجمع سرب در قسمت‌های خوراکی گیاه خطر قابل توجهی برای سلامت انسان ایجاد می‌کند که ممکن است در بلندمدت منجر به اختلالات عصبی و ناهنجاری‌های رشدی شود (Gupta et al., 2024). تنش سرب باعث اختلالات کلی در مکانیسم‌های فیزیولوژیکی در گیاهان مانند فعالیت آنزیمی، ساختار غشاء، پتانسیل آب، انتقال الکترون و وضعیت هورمونی می‌شود. تغییرات

مورفولوژیکی متعددی در تمام قسمت‌های گیاه ایجاد می‌شود، مانند تأخیر در جوانه‌زنی بذر و کاهش رشد نهال، رشد کم ریشه و ساقه، کاهش شاخه‌دهی، کاهش کلی زیست‌توده ریشه، کاهش تولید گل و رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش جذب مواد معدنی مغذی (Ghouri et al., 2024). تنش سرب ممکن است باعث کلروز، نکروز و پیچیدگی برگ‌ها شود. این علائم نشان‌دهنده کاهش کارایی فتوسنتزی و کاهش جذب مواد مغذی است (Jia et al., 2022).

برای کاهش تحرک و قابلیت دسترسی زیستی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی، در دهه‌های گذشته تکنیک‌های مقرون به صرفه و دوست‌دار محیط زیست بسیاری توسعه یافته‌اند (He et al., 2019). از اصلاح-کننده‌های شیمیایی مانند آهک، خاکستر زغال‌سنگ، بیوجار برای تثبیت فلزات سنگین و در نتیجه کاهش تحرک و قابلیت دسترسی زیستی آنها در خاک استفاده شده است (Hong et al., 2022). در عین حال، گیاه‌پالایی به عنوان روشی دوست‌دار محیط زیست و اقتصادی در پالایش خاک-های آلوده به فلزات سنگین بوده است (Ashraf et al., 2019; Liu et al., 2020).

ماده آلی خاک نقش مهمی در تثبیت بخش‌های قابل‌دسترس فلزات سنگین دارد. یکی از روش‌های اخیر، تثبیت درجا فلزات با افزودن موادی است که ظرفیت بالایی برای نگهداری فلزات دارند. انواع مختلفی از مواد آلی مانند کمپوست صنایع غذایی، زباله‌های شهری، کودها و بقایای کشاورزی ممکن است برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات استفاده شوند (Khan et al., 2018). گزارش شده است که مواد آلی توانایی کاهش دسترسی فلزات را از طریق تشکیل کمپلکس با گروه‌های فعال موجود در خود دارند (Karlsson et al., 2007). برخی مطالعات نشان داده‌اند که افزایش pH خاک با استفاده از بیوجار ممکن است بر دسترسی مواد مغذی و جذب گیاهان تأثیر بگذارد (Khan et al., 2018). کربن سیاه یک توده پودری از ذرات ریز سیاه است. این ماده از کربن ناخالص تشکیل شده است و از احتراق ناقص مواد نفتی سنگین مانند قیر زغال‌سنگ و قیر کراکینگ اتیلن تولید می‌شود. کربن سیاه تحت شرایط کنترل‌شده در صنایع لاستیک، چاپ و رنگ‌سازی برای استفاده تجاری تولید می‌شود (Long et al., 2013; Medalia et al., 1983). تقریباً ۸۰ درصد از بازار جهانی کربن سیاه برای کاهش ساینده‌گی و افزایش خاصیت

الاستیکی در لاستیک‌سازی استفاده می‌شود. به طور کلی، کربن سیاه بافت متخلخل کمتری نسبت به برخی دیگر از مواد کربنی دارد. علاوه بر این، کربن سیاه معمولاً دارای فضای ماکرو و مزوپور هستند و حجم میکروپور کمی دارند. این ویژگی، آنها را به عنوان جاذب‌های احتمالی آلاینده‌های آلی از فاز مایع بسیار مناسب می‌سازد. مهمترین گروه‌های سطحی که بر خواص فیزیکوشیمیایی کربن سیاه تأثیر می‌گذارد، ساختارهای کربن-اکسیژن هستند (Cuerda-Correa et al., 2010). کربن سیاه دارای سطح ویژه زیاد و گروه‌های عاملی سطحی فراوان است، بنابراین به عنوان جاذب و حامل کاتالیزور فلزی در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، در سال‌های اخیر مشخص شده است که انواع مختلفی از کربن سیاه می‌توانند به عنوان کاتالیزور بدون فلز برای واسطه‌گری در تبدیل و تجزیه آلاینده‌های آلی خاص در دمای اتاق استفاده شوند (Liang et al., 2022). گروه‌های عاملی کربوکسیلیک، فنلی، کربونیلی، هیدروکسیلی و سایر گروه‌های عاملی در لبه‌های لایه کربنی قرار دارند و مسئول واکنش‌پذیری سطحی کربن سیاه هستند (Radenović & Malina, 2013). با این حال، کربن سیاه خام اغلب ظرفیت جذب پایینی برای یون‌های فلزی دارد (Duo et al., 2017). مطالعات محدودی در زمینه تأثیر دوده کربن بر کاهش سمیت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی انجام شده است. در پژوهش حاضر اثر دوده کربن و آلودگی خاک با سرب بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک و رشد گیاه با قلا بررسی و از سطوح مختلف دوده کربن برای کاهش جذب سرب توسط گیاه با قلا و بهبود رشد گیاه در خاک آلوده به سرب استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۲ در گلخانه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، واقع در ملائانی (۳۵ کیلومتری شمال شرقی اهواز) و در امتداد شرق رود کارون با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه انجام گرفت. نمونه خاک مورد مطالعه به صورت مرکب از

عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری تهیه شد. برخی ویژگی‌های خاک در جدول ۱ آورده شده است. آزمایش به صورت فاکتوریل با دو فاکتور آلودگی سرب از منبع نیترات سرب در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کربن سیاه در چهار سطح (۰، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. دوده کربن از شرکت کربن ایران تهیه شد که دارای سطح ویژه ۱۱۵-۱۰۰ مترمربع در گرم و مقدار pH در عصاره ۱:۵ معادل ۸/۵ بود. مقدار پنج کیلوگرم خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب، که از نیترات سرب تهیه شده و یک ماه پیش از کاشت تهیه شده بودند، در گلدان‌ها قرار گرفتند. پس از دوره انکوباسیون، اندازه‌گیری سرب کل نشان داد که غلظت سرب در تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب ۴۷/۱ و ۹۸/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. دوده کربن نیز مطابق با تیمارها به خاک اضافه و مخلوط شد. خاک آماده شده در گلدان‌ها ریخته شدند و برای زهکشی مناسب، سوراخ‌هایی یکسان در کف گلدان‌ها ایجاد شد. همچنین، برای جلوگیری از خروج خاک، از توری پلاستیکی در کف گلدان‌ها استفاده شد. بذرها با قلا به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر خیسانده شده و سپس به گلدان‌ها منتقل شدند. ابتدا در هر کیسه، پنج حفره با عمق سه سانتی‌متر ایجاد شد. در هر حفره یک بذر قرار گرفته، سپس با خاک پوشانده و آبیاری انجام شد. پس از جوانه‌زنی، تعداد گیاهان به سه عدد کاهش یافت. در هفته چهارم رشد، در صورت نیاز، کوددهی انجام شد. آبیاری با آب مقطر، بسته به نیاز گیاه، یک تا دو بار در هفته صورت گرفت. دو ماه پس از کشت، ارتفاع هر گیاه از محل طوقه تا بالاترین نقطه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شده و میانگین ارتفاع در هر گلدان ثبت شد. ریشه و اندام هوایی گیاهان پس از توزین، به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس درون آون خشک شدند، سپس وزن آن‌ها اندازه‌گیری و برای انجام آنالیز شیمیایی، آسیاب و نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری غلظت سرب در ریشه و اندام هوایی از روش هضم با دو اسید (اسید پرکلریک و اسید نیتریک) استفاده شد (Hseu et al., 2002).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده

Table 1. Some properties of used soil

Soil texture	pH	EC (dS m ⁻¹)	Organic carbon (%)	Calcium carbonate (%)	Total Pb (mg kg ⁻¹)
Loam	7.2	1.8	0.6	39	5.50

نرمال، واکنش متوقف گردید و نمونه‌های صاف شده با محلول پرمنگنات پتاسیم ۰/۰۵ مولار تیترا شدند. فعالیت این آنزیم برحسب $\text{mL KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ محاسبه گردید.

نتایج و بحث

تاثیر تیمارها بر مؤلفه‌های رشدی گیاه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر مستقل تیمارها بر ارتفاع اندام هوایی گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۲). با افزایش سطح آلودگی خاک به فلز سرب، ارتفاع گیاه کاهش یافت؛ به طوری که در سطح آلودگی ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم، ارتفاع گیاه ۱۳/۶۳ درصد از شرایط بدون آلودگی کمتر بود. از سویی دیگر، افزودن دوده کربن به خاک (سطح چهار درصد وزنی) موجب افزایش ارتفاع اندام هوایی به میزان ۲۲/۸۶ درصد نسبت به شاهد شد (جدول ۳).

سطح بالای سرب در گیاهان منجر به تغییرات بیوشیمیایی یا فیزیولوژیکی مانند کاهش نرخ جوانه‌زنی، کاهش تولید پروتئین، کاهش باز و بسته شدن روزنه‌ها می‌شود (Dalyan *et al.*, 2020). به دلیل سمیت سرب، نرخ تعرق و مقدار آب و مواد مغذی که به مناطق بالایی گیاه می‌رسد کاهش یابد. علاوه بر این، افزایش نشت الکترولیت، تجمع مالون-دی‌آلدئید، آنتی‌اکسیدان‌ها، اسمولیت‌ها و رادیکال‌های آزاد (H_2O_2 ، O_2^-) به دلیل سمیت سرب در گیاهان رخ می‌دهد. به دلیل افزایش رادیکال‌های آزاد، ساختار بیوشیمیایی ماکرومولکول‌ها تغییر می‌کند و فعالیت فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را کاهش می‌دهد و در عملکرد آنزیم‌های دخیل در فرآیندهای متابولیکی تداخل ایجاد می‌کند. این منجر به کاهش فعالیت فتوسنتزی، کاهش سنتز ATP و کاهش رشد و توسعه گیاهان می‌شود (Phaniendra *et al.*, 2015).

میزان سرب موجود در ریشه و اندام هوایی توسط دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (Contr AA 300) اندازه‌گیری شد. جهت بررسی توانایی گیاه در انتقال فلز از ریشه به بخش هوایی، فاکتور انتقال سرب محاسبه شد که از نسبت غلظت سرب در اندام هوایی به غلظت آن در ریشه به دست آمد (Yoon *et al.*, 2006).

اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های زیستی خاک

برای اندازه‌گیری تنفس پایه، از روش به دام انداختن دی‌اکسید کربن تولید شده در محلول سود استفاده شد (Anderson *et al.*, 1982). مقدار سود باقیمانده پس از افزودن چند قطره کلرید باریم ۰/۵ نرمال و چند قطره فنل فتالئین، سپس تیتراسیون با اسید کلریدریک ۰/۳ نرمال اندازه‌گیری شد. میزان دی‌اکسید کربن متصاعد شده از خاک برحسب میلی گرم در روز محاسبه شد. برای اندازه‌گیری کربن زیست‌توده میکروبی، از روش تدخین-استخراج استفاده شد (Nelson & Sommers., 1996). عصاره‌گیری خاک تدخین شده با کلروفرم و خاک تدخین نشده با سولفات پتاسیم ۰/۵ مولار انجام شد. مقدار کربن آلی محلول در عصاره نمونه‌های تدخین شده و تدخین نشده به روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری شد. میزان کربن زیست‌توده میکروبی با در نظر گرفتن ضریب ۰/۴۵ به عنوان راندمان تجزیه، برحسب میلی گرم کربن در صد گرم خاک محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز از روش تیتراسیون استفاده شد (Johnson & Temple, 1964). سوسپانسیون خاک حاوی ۴۰ میلی لیتر آب مقطر و ۵ میلی لیتر محلول آب اکسیژنه ۰/۳ درصد به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۳۷ درجه سلسیوس و با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه تکان داده شد. سپس با افزودن ۵ میلی لیتر اسید سولفوریک ۱/۵

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تاثیر سطوح سرب و دوده کربن بر رشد گیاه، غلظت، جذب و فاکتور انتقال سرب.

Table 2. The results of the analysis of variance on the effect of Pb and carbon black levels on plant growth, concentration, uptake, and translocation factor of lead.

Source of variations	df	Height	Root dry weight	Shoot dry weight	Pb in root	Pb uptake by root	Pb in shoot	Pb uptake by shoot	Translocation Factor
Carbon Black	3	55.2**	0.80**	0.79**	11.78**	6.120E-05**	3.97**	1.745E-05**	0.027 ^{ns}
Pb pollution	2	50.4**	6.87**	4.39**	107.42**	9.852E-04**	48.24**	3.193E-04**	0.214**
× Carbon Black	6	1.7 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.083 ^{ns}	4.79**	2.612E-05**	1.92**	1.004E-062**	0.008 ^{ns}
Pb pollution									
Error	36	5.68	0.07	0.094	0.28	3.023E-06	0.09	9.696E-07	0.01
CV	-	9.84	7.44	10.61	18.27	20.74	18.09	21.63	19.43

Df: Degree of freedom, CV: Coefficient of Variations, **, * and ^{ns} respectively significant at 1%, 5% and nonsignificant.

هوایی به ترتیب ۴/۲۴ و ۳/۵۷ گرم در گلدان در تیمار بدون آلودگی ثبت شد. در سطح آلودگی ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم، وزن خشک ریشه و اندام هوایی به ترتیب ۳۰/۶۶ و ۲۹/۶۹ درصد کمتر از تیمار شاهد کاهش بود (جدول ۳). سمیت سرب تأثیر مضر بر جوانه زنی، فرآیندهای فیزیولوژیکی، فعالیت‌های بیوشیمیایی، عملکرد، محتوای معدنی و ویژگی‌های کلی رشد گندم داشته است. علت اصلی این تأثیرات منفی کاهش نرخ فتوسنتز بوده است که به نوبه خود منجر به کاهش تعرق و هدایت روزنه‌ای می‌شود (Kanwal et al., 2020). سرب جوانه زنی بذرها را مهار کرده و رشد نهال‌ها را کند می‌کند، درصد جوانه زنی، شاخص جوانه زنی، طول ریشه/ساقه، وزن خشک ریشه‌ها و ساقه‌ها را کاهش می‌دهد (Mishra et al., 2006). رشد ریشه، ساقه و برگ؛ زیست‌توده تازه و خشک در *Pisum Sativum* و *Zea mays* به شدت کاهش یافت (Çimrin et al., 2007). آسیب به سیستم ریشه گیاه و کاهش قدرت تعرق ناشی از سرب باعث کاهش جذب آب و تأمین ناکافی آب برای قسمت‌های بالای زمین گیاه می‌شود (Kastori et al., 1992).

دوده کربن همانند بیوپار می‌تواند سرب را در خاک تثبیت کند و دسترسی زیستی و سمیت آن را برای گیاهان کاهش دهد. این امر به گیاهان کمک می‌کند تا در محیط‌های آلوده بهتر رشد کنند. این مواد ویژگی‌های خاک مانند تخلخل و نگهداری آب، و دسترسی به مواد مغذی را بهبود می‌بخشند و شرایط بهتری را برای رشد گیاه ایجاد می‌کنند (Bozar et al., 2010; Premalatha et al., 2023). به عنوان مثال، بیوپار حاصل از هرس سیب، هرس انگور و کاه گندم توانسته است غلظت سرب در شاخ و برگ کاهو را کاهش داده و زیست‌توده گیاه را بهبود بخشد (Bozar et al., 2010). کربن سیاه می‌تواند فعالیت میکروبی را در خاک افزایش دهد که نقش مهمی در چرخه مواد مغذی و تثبیت فلزات سنگین دارد و می‌تواند منجر به رشد بهتر گیاه شود (Wan et al., 2022). نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر مستقل آلودگی خاک به فلز سرب و کاربرد دوده کربن بر وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۲). با افزایش میزان آلودگی خاک به فلز سرب، وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه کاهش یافت. بیشترین میانگین وزن خشک ریشه و اندام

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف سرب و کربن سیاه بر برخی ویژگی‌های گیاه. میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

Table 3. Comparison of the mean effects of different levels of Pb and carbon black on some plant properties. Means with the same letters are not significantly different at the 5% level according to Tukey's test.

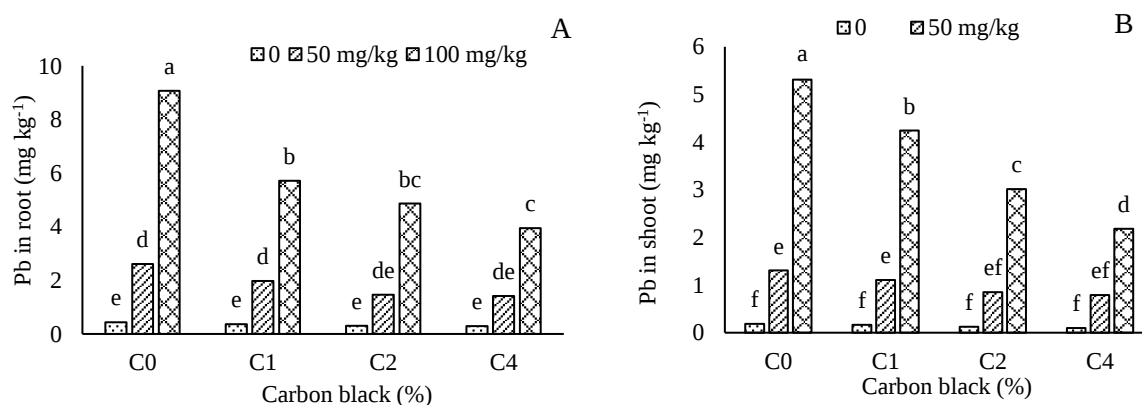
Treatments	Plant height (cm)	Dry weight of root (g pot ⁻¹)	Dry weight of shoot (g pot ⁻¹)
Without carbon black	21.43 ^b	3.34 ^a	2.75 ^b
Carbon black (1%)	23.79 ^{ab}	3.50 ^{bc}	2.97 ^b
Carbon black (2%)	25.4 ^a	3.67 ^{ab}	3.01 ^b
Carbon black (4%)	26.33 ^a	3.95 ^a	3.37 ^a
Without lead pollution	26.03 ^a	4.24 ^a	3.57 ^a
Lead pollution (50 mg/kg)	24.19 ^{ab}	3.66 ^b	2.97 ^b
Lead pollution (100 mg/kg)	22.48 ^b	2.94 ^c	2.51 ^c

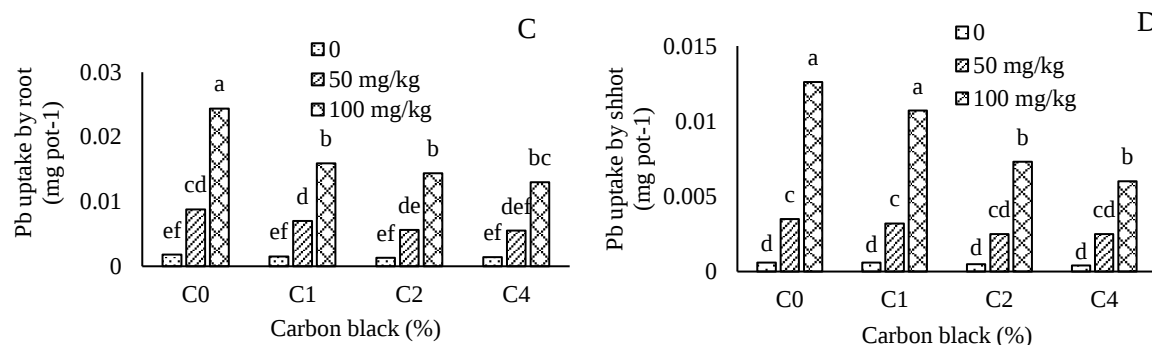
Numbers followed by same letters in each column are not significantly different ($P < 0.05$).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر متقابل آلودگی خاک و دوده کربن بر غلظت و جذب سرب در ریشه و اندام هوایی گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. با افزایش سطح آلودگی، غلظت و جذب سرب در ریشه و اندام هوایی افزایش یافت، اما کاربرد دوده کربن باعث کاهش این مقادیر شد. بیشترین غلظت سرب در ریشه گیاه با میانگین ۹/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در تیمار بدون کاربرد دوده کربن و سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، و کمترین مقدار با میانگین ۰/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار چهار درصد دوده کربن و بدون افزودن سرب به خاک اندازه‌گیری شد (شکل ۱ الف). استفاده از چهار درصد دوده کربن در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث کاهش غلظت و جذب سرب در ریشه گیاه به میزان ۵۶/۵۶ درصد و ۴۶/۷۲ درصد شد (شکل ۱ الف و ج). بیشترین غلظت سرب در اندام هوایی گیاه، با میانگین ۵/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار عدم کاربرد دوده کربن و سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و کمترین مقدار با میانگین ۰/۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در تیمار چهار درصد دوده کربن و بدون افزودن سرب به خاک ثبت شد. کاربرد چهار درصد دوده کربن در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم منجر به کاهش غلظت و جذب سرب در اندام هوایی به میزان ۵۸/۹۲ درصد و ۵۲/۳۸ درصد شد (شکل ۱ ب و د).

ریشه‌ها در خاک آلوده به سرب به دلیل تداخل سرب با تقسیم سلولی کوتاه‌تر و ضخیم‌تر می‌شوند (Jia *et al.*, 2022). سرب همچنین می‌تواند فعالیت و مقدار آنزیم‌های کلیدی مسیرهای متابولیکی مختلف مانند چرخه کالوین، متابولیسم نیتروژن و متابولیسم قند را تغییر دهد. برگ‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین اندام‌های گیاه به دلیل نقش آنها در جذب نور و تولید غذا از طریق فرآیند فتوسنتز محسوب می‌شوند (Stevens *et al.*, 1997; Verma & Dubey, 2003). کاربرد دوده کربن باعث افزایش مقدار وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه به میزان ۱۸/۲۶ و ۲۲/۵۴ درصد نسبت به شاهد شد (جدول ۳). این اثر مثبت به ویژگی‌های جذبی زغال فعال نسبت داده می‌شود، که احتمالاً قابلیت زیستی سرب را محدود کرده و تنش اکسیداتیو مرتبط را کاهش داده است، در نتیجه منجر به رشد بهتر و افزایش زیست‌توده گیاه شده است (Mazaheri-Tirani *et al.*, 2024). مواد اصلاحی آلی با تاثیر مثبت بر ویژگی‌های فیزیکی خاک همانند ساختمان خاک، تهویه و ظرفیت نگهداشت آب در خاک، موجب بهبود رشد ریشه می‌شود (Chan *et al.*, 2018). ظرفیت نگهداری آب، نگهداری مواد مغذی و آزادسازی آنها با افزایش سطح ویژه و تخلخل کربن سیاه افزایش می‌یابد (Alkharabsheh *et al.*, 2021).

غلظت و جذب سرب در ریشه و اندام هوایی





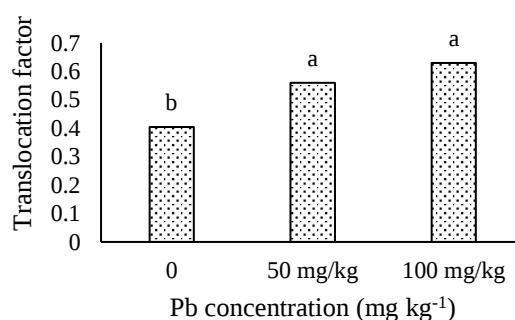
شکل ۱- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف سرب و کربن سیاه بر غلظت و جذب سرب در ریشه و اندام هوایی.

میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

Figure 1. Comparison of the mean effects of different levels of Pb and carbon black on the concentration and uptake of Pb in roots and shoots. Means with the same letters are not have significantly different at the 5% level according to Tukey's test.

محدود عنصر مورد نظر در اندام‌های گیاهی است (Shakoori *et al.*, 2021). در مطالعه حاضر، غلظت سرب در ریشه بیشتر از مقدار آن در اندام هوایی بود (شکل ۲ الف و ب)، که نشان دهنده توانایی ریشه در نگه‌داشت سرب و کاهش انتقال آن به بخش‌های هوایی گیاه است (Tafvizi & Motesharezadeh, 2014; Abdollahi & Golchin, 2018).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر مستقل سطح آلودگی بر فاکتور انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی معنی‌دار بود. با افزایش سطح آلودگی، میزان این فاکتور افزایش یافت؛ به‌طوری‌که در سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد ۵۵/۶۹ درصد افزایش داشت (شکل ۲). گیاهان معمولاً فاکتور انتقال کمتر از یک دارند که بیانگر تمایل بیشتر آن‌ها به تجمع عنصر در ریشه نسبت به بخش هوایی است. این ویژگی نشان دهنده تحرک



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف سرب بر فاکتور انتقال سرب

میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

Figure 2. Comparison of the mean effects of different Pb levels on translocation factor of Pb.

Means with the same letters are not significantly different at the 5% level according to Tukey's test.

و کشاورزی و سازمان بهداشت جهانی (۲۰۱۵)، حد مجاز سرب بین ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم است. قابلیت دسترسی فلزات سمی تحت تأثیر تحرک فلزات سمی، خواص خاک و شرایط محیطی قرار دارد (Chen *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2020). افزایش غلظت سرب در خاک،

این ویژگی می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیان‌بار فلزات سنگین در گیاهان داشته باشد. محصولات کشاورزی که در خاک‌های آلوده به سرب رشد می‌کنند، ممکن است حاوی غلظت‌های بالاتری از این فلز سمی در بافت‌های خود باشند (Anwar *et al.*, 2020). بر اساس گزارش سازمان غذا

غلظت آن را در ریشه و اندام هوایی افزایش می‌دهد (Tafviz & Motesharezadeh, 2014). استفاده از برخی مواد کربنی مانند بیوچار می‌تواند تحرک فلزات سمی را در خاک کاهش دهد، زیرا دارای گروه‌های عاملی فعال مانند $-C=O$ ، $-COOH$ و گونه‌های یونی معدنی (مانند PO_4) است (Palansooriya et al. 2020; Pan et al. 2021)، که می‌توانند با فلزات سمی کمپلکس تشکیل داده (Abdin et al. 2019; Xiao et al. 2019) و قابلیت دسترسی فلزات سمی را در خاک و در نتیجه غلظت سرب را در ریشه و ساقه کاهش دهند (Albert et al., 2021; Houssou et al., 2022).

بررسی اثر تیمارها بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل آلودگی خاک و دوده کربن بر تنفس پایه، کربن زیتوده میکروبی و فعالیت کاتالاز خاک در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش سطح آلودگی، مقدار تنفس میکروبی، کربن زیتوده میکروبی و فعالیت آنزیم کاتالاز خاک کاهش یافت؛ اما کاربرد دوده کربن موجب افزایش آنها شد. بیشترین مقدار تنفس پایه با میانگین $64/89 \text{ mg CO}_2/100\text{g}^{-1}.\text{day}^{-1}$ در تیمار بدون آلودگی و چهار درصد دوده کربن اندازه‌گیری شد که نسبت به تیمار شاهد (بدون آلودگی و بدون دوده کربن) $18/9$ درصد افزایش داشت (شکل ۳ الف). آلودگی خاک به فلزات سنگین باعث کاهش تنفس میکروبی خاک می‌شود که این احتمالاً به علت اثرات منفی آلودگی

بر زیست توده ریشه گیاه و اثرات متقابل فلزها و سمیت یونی باشد که باعث تأثیر بر مسیر متابولیسی سلول‌های میکروبی گردیده است (Karimi & Khodaverdiloo, 2014). بیشترین مقدار کربن زیتوده میکروبی با میانگین $13/35 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ در تیمار بدون آلودگی و چهار درصد دوده کربن اندازه‌گیری شد که نسبت به تیمار شاهد (بدون آلودگی و بدون دوده کربن) $61/42$ درصد افزایش داشت (شکل ۳ ب). با افزایش سطوح سرب در خاک کربن زیتوده میکروبی کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2010). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۳ ج) نشان داد که با افزایش سطح آلودگی فعالیت آنزیم کاتالاز در خاک کاهش یافت و کاربرد دوده کربن باعث افزایش این ویژگی شد. بیشترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز با میانگین $1 \text{ ml KMnO}_4\text{g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$ در تیمار بدون آلودگی و $1/82$ درصد دوده کربن اندازه‌گیری شد، که نسبت به تیمار شاهد (بدون آلودگی و بدون دوده کربن) $73/33$ درصد افزایش داشت. افزودن کربن آلی به عنوان اصلاح کننده به خاک موجب تحریک فعالیت تنفسی، کربن زیتوده میکروبی و فعالیت کاتالاز خاک شد. فعالیت جامعه میکروبی خاک به مقدار کربن آلی خاک وابسته است، در نتیجه هرگونه تغییر در مقدار کربن آلی خاک بر کربن زیتوده میکروبی خاک تأثیر می‌گذارد. در تحقیقی افزودن بیوچار به خاک سمیت سرب را کاهش داده و غنای میکروبی (مانند *Mucilagibacter*، *Alkanibacter* و *Burkholderiaceae* و *Beggiatoaceae*) را افزایش داده است (Wan et al., 2022).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح سرب و دوده کربن بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک

Table 4. The results of the analysis of variance on the effect of Pb and carbon black levels on some biological properties of soil

Source of variations	df	Soil respiration	Microbial biomass carbon	Catalase activity
Carbon Black	3	345.40**	35.42**	0.71**
Pb pollution	2	539.60**	41.35**	0.32**
Pb pollution × Carbon Black	6	42.51*	2.32*	0.046*
Error	36	14.46	0.69	0.01
CV	-	7.93	9.49	12.51

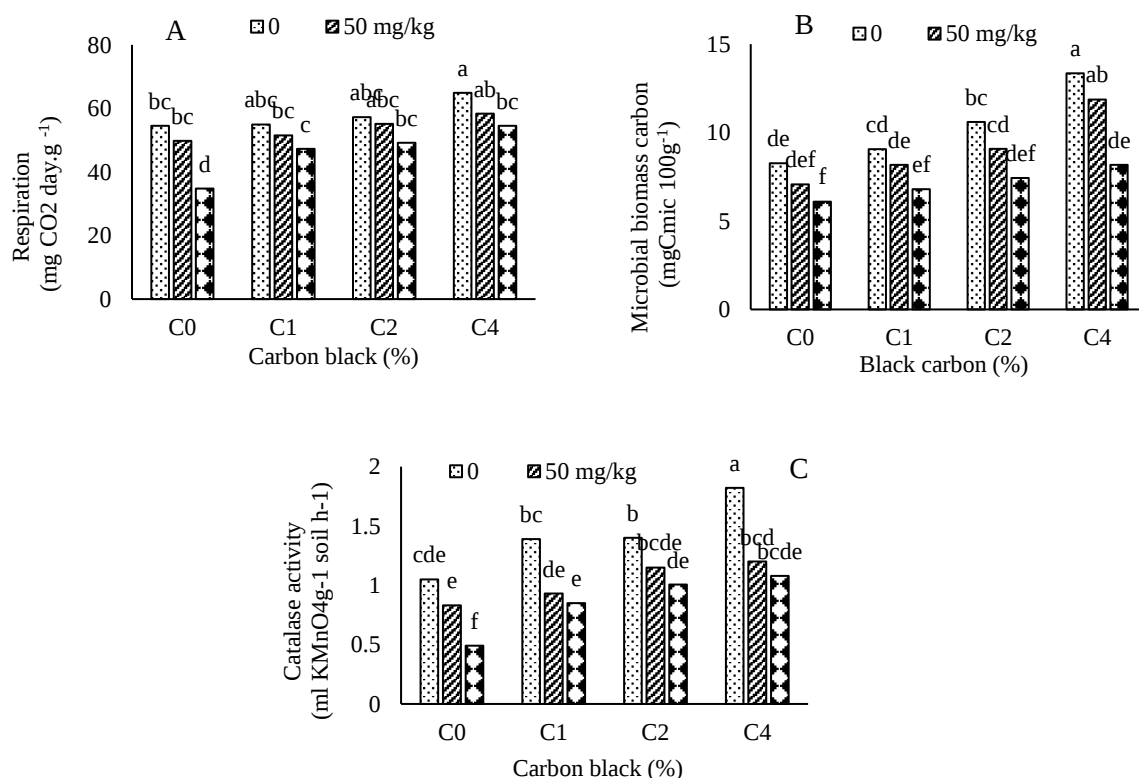
**, * and ns respectively significant at 1%, 5% and nonsignificant.

اثرات سمی سرب قابل دسترس در خاک‌ها ممکن است متابولیسم میکروبی را مختل کند، زیتوده را کاهش دهد و تنوع و فراوانی نسبی جامعه میکروبی را تغییر دهد (Sobolev & Begonia, 2008, Xu et al., 2018). فلزات سنگین می‌توانند از طریق واکنش با کمپلکس‌های آنزیم-

سوپسترا، واکنش با گروه‌های فعال پروتئین و خارج کردن پروتئین آنزیم از حالت طبیعی باعث کاهش فعالیت آنزیمی و عمل کاتالیزوری آنها می‌شوند، همچنین فلزات سنگین با تغییر در فراوانی، تنوع و فعالیت میکروبی تولیدکننده آنزیم، فعالیت آنزیمی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند

سلسیوس در خاک‌های آلوده به کادمیوم به دلیل تثبیت کادمیوم افزایش یافت (Bashir *et al.*, 2018). شاخص‌های میکروبی و بیوشیمیایی بهبود یافته خاک تحت تنش فلزات سمی ناشی از کاربرد بیوچار می‌تواند به کاهش سمیت فلزات، محتوای بالاتر کربن آلی خاک و فراهم کردن بسترهای کربنی و مواد مغذی برای میکروب‌های خاک و افزایش نگهداری و تأمین آب خاک نسبت داده شده است (Azadi & Raiesi, 2021).

(Shu *et al.*, 2018). فعالیت آنزیم کاتالاز باعث سمیت‌زدایی فلزات سنگین می‌شود (Lin *et al.*, 2021). افزایش فعالیت کاتالاز پس از افزودن بیوچار ممکن است به دلیل کاهش سمیت یا قابلیت زیستی فلزات سنگین باشد (Irshad *et al.*, 2022). مطالعات نشان داده‌اند که افزایش فعالیت کاتالاز به چرخه کربن خاک کمک می‌کند (Li *et al.*, 2021). زیست‌توده میکروبی خاک و فعالیت‌های آنزیمی با کاربرد بیوچار باگاس تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف سرب و کربن سیاه بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک.

میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

Figure 3. Comparison of the mean effects of different levels of Pb and carbon black on some biological characteristics of soil. Means with the same letters are not significantly different at the 5% level according to Tukey's test.

است. میکروب‌های خاک، بخش زنده ماده آلی خاک را تشکیل می‌دهند و مسئول آزادسازی مواد مغذی از ماده آلی برای استفاده گیاهان هستند (Černý *et al.*, 2008). این یافته‌ها نشان می‌دهد استفاده از مواد اصلاحی در خاک، با بهبود ویژگی‌های زیستی، نقش مهمی در افزایش رشد گیاهان در شرایط آلودگی خاک با فلز سنگین دارد. جوامع میکروبی موجود در خاک نقش حیاتی در حفظ پایداری طولانی‌مدت اکوسیستم‌های خاک دارند. آنها فرآیندهایی مانند تشکیل و تجزیه مواد آلی خاک، چرخه مواد مغذی،

همبستگی بین شاخص‌های رشدی گیاه و ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج جدول (۵) نشان داد که بین ویژگی‌های زیستی مورد مطالعه در این تحقیق، شامل آنزیم کاتالاز، تنفس خاک و کربن زیتوده میکروبی خاک، و مؤلفه‌های رشدی گیاه همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود داشت. در مقابل، مقدار فلز سرب در اندام هوایی و ریشه گیاه با ویژگی‌های زیستی خاک همبستگی منفی نشان داد. فعالیت میکروبی به طور مستقیم با غلظت عناصر غذایی مفید و رشد گیاهان مرتبط

تثبیت کربن، تجزیه مواد آلی مضر و همچنین تبدیل زیستی
فلزات سمی در خاک را تنظیم می‌کنند. این فعالیت‌ها به
حفظ سلامت خاک و تعادل اکوسیستم‌های مرتبط کمک

می‌کند (Abdu et al., 2017; Nannipieri et al., 2017; Xu et al., 2019).

جدول ۵- ضریب همبستگی برخی ویژگی‌های زیستی خاک با ویژگی‌های گیاه

Table 5. Correlation coefficient of some biological characteristics of soil with plant properties.

	Plant height	Dry weight of root	Dry weight of shoot	Pb in root	Pb in shoot
Soil respiration	0.70**	0.71**	0.63**	-0.77**	-0.77**
Microbial biomass carbon	0.61**	0.70**	0.74**	-0.63**	-0.65**
Catalase activity	0.62**	0.73**	0.75**	-0.68**	-0.68**

** , * and ^{ns} respectively significant at 1%, 5% and nonsignificant.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج، آلودگی خاک به سرب موجب کاهش ارتفاع گیاه، وزن خشک آن و میزان کربن زیتوده میکروبی خاک شد؛ در حالی که استفاده از دوده کربن باعث افزایش این ویژگی‌ها گردید. این یافته‌ها نشان می‌دهد حضور طولانی مدت در خاک می‌تواند به اکوسیستم خاک آسیب وارد کند. افزودن دوده کربن، سرب موجود در ریشه و اندام هوایی گیاه را کاهش داده و موجب بهبود ویژگی‌های زیستی خاک شده است. بیشترین افزایش در ویژگی‌های زیستی خاک مانند کربن زیتوده میکروبی، تنفس میکروبی خاک و فعالیت آنزیم کاتالاز، در تیمار چهار درصد دوده کربن و بدون آلودگی سرب مشاهده شد. با وجود نتایج به‌دست آمده که نشان دهنده تاثیر مثبت دوده کربن بر کاهش غلظت سرب در گیاه و بهبود ویژگی‌های زیستی خاک است؛ توصیه نهایی

برای استفاده از آن نیازمند بررسی‌های بیشتر و ارزیابی اقتصادی است. علاوه بر این، دوده حاصل از پالایشگاه‌های نفت ممکن است حاوی فلزات سنگین، به‌ویژه نیکل و وانادیم، باشد که لازم است پیش از استفاده مورد بررسی قرار گیرد. در صورتی که فرآیند فلززدایی به‌طور مناسب انجام نشود، این ماده می‌تواند منجر به بروز مشکلات زیست‌محیطی و مخاطراتی برای سلامت انسان شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین به دلیل فراهم آوردن امکانات انجام این پژوهش و دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌نمایند.

Reference

- Abdin Y., Usman A., Ok Y.S., Tsang Y.F. and Al-Wabel M. 2020. Competitive sorption and availability of coexisting heavy metals in mining-contaminated soil: Contrasting effects of mesquite and fishbone biochars. *Environmental Research*, 181, p.108846.
- Abdollahi S., Golchin, A. 2018. Evaluate ability of uptake and translocation of lead in three varieties of cabbage. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 49 (1): 145-158. (In Persian)
- Abdu N., Abdollahi A.A. and Abdulkadir A. 2017. Heavy metals and soil microbes. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1): 65-84.
- Albert H.A., Li X., Jeyakumar P., Wei L., Huang L., Huang Q., Kamran M., Shaheen S.M., Hou D., Rinklebe J. and Liu, Z. 2021. Influence of biochar and soil properties on soil and plant tissue concentrations of Cd and Pb: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 755, p.142582.
- Alkharabsheh H.M., Seleiman M.F., Battaglia M.L., Shami A., Jalal R.S., Alhammad B.A., Zhao Q., Li J., Sarkar B., Wu W., Li B., Liu R., Nawaz M., Zia-ur-Rehman M., Wang H. and Wu Z. 2020. Sorption mechanisms of lead on soil-derived black carbon formed under varying cultivation systems. *Chemosphere*, 261, p.128220.
- Anderson J.P.E. 1982. Soil respiration. In. *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties*, ed. A.L. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin, pp 831-871.
- Anwar H., Shahid M., Niazi N.K., Khalid S., Tariq T.Z., Ahmad S., Nadeem M. and Abbas G. 2021. Risk assessment of potentially toxic metal (loid) s in *Vigna radiata* L. under wastewater and freshwater irrigation. *Chemosphere*, 265, p.129124.

- Ara A. and Usmani J.A. 2015. Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary Toxicology*, 8(2): 55-64.
- Ashraf S., Ali Q., Zahir Z. A., Ashraf S., and Asghar H. N. 2019. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 174: 714-727.
- Azadi N. and Raiesi, F. 2021. Biochar alleviates metal toxicity and improves microbial community functions in a soil co-contaminated with cadmium and lead. *Biochar*, 3(4): 485-498.
- Bashir S., Hussain Q., Akmal M., Riaz M., Hu H., Ijaz S.S., Iqbal M., Abro S., Mehmood S. and Ahmad M. 2018. Sugarcane bagasse-derived biochar reduces the cadmium and chromium bioavailability to mash bean and enhances the microbial activity in contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 18: 874-886.
- Bozar V., Rang Zan N. and Nadian Qomsheh H. 2010. The effect of carbon black and hair waste on heavy metals uptake and some growth parameters of lettuce and spinach irrigated with metal contaminated water. *Agricultural Engineering*, 42(1): 61-80.
- Černý J., Balík J., Kulháněk M., Nedvěď V. 2008. The changes in microbial biomass C and N in long-term field experiments. *Plant, Soil and Environment*, 54(5), 212-218.
- Chan K.Y., Van Zwieten L. Meszaros I. Downie A. and Joseph S. 2018. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, 46(5): 437-444.
- Chen D., Liu X., Bian R., Cheng K., Zhang X., Zheng J., Joseph S., Crowley D., Pan G. and Li L. 2018. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals—A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 222: 76-85.
- Çimrin K.M., Turan M. and Kapur B. 2007. Effect of elemental sulphur on heavy metals solubility and remediation by plants in calcareous soils. *Fresenius Environmental Bulletin*, 16(9): 1113-1120.
- Cuerda-Correa E.M., Domínguez-Vargas J.R., Olivares-Marín F.J. and de Heredia J.B. 2010. On the use of carbon blacks as potential low-cost adsorbents for the removal of non-steroidal anti-inflammatory drugs from river water. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3): 1046-1053.
- Dalyan E., Yüzbaşıoğlu E. and Akpınar I. 2020. Physiological and biochemical changes in plant growth and different plant enzymes in response to lead stress. *Lead in Plants and the Environment*, 129-147.
- Duo L., He L. and Zhao S. 2017. The impact of modified nanoscale carbon black on soil nematode assemblages under turfgrass growth conditions. *European Journal of Soil Biology*, 80: 53-58.
- Food and Agriculture Organization and World Health Organization. 2015. General standard for contaminants and toxins in food and feed, CODEX STAN 193-1995. World Health Organization, Geneva
- Ghouri F., Sarwar S., Sun L., Riaz M., Haider F.U., Ashraf H., Lai M., Imran M., Liu J., Ali S. and Liu X. 2024. Silicon and iron nanoparticles protect rice against lead (Pb) stress by improving oxidative tolerance and minimizing Pb uptake. *Scientific Reports*, 14(1), p.5986.
- Gupta M., Dwivedi V., Kumar S., Patel A., Niazi, P. and Yadav V.K. 2024. Lead toxicity in plants: mechanistic insights into toxicity, physiological responses of plants and mitigation strategies. *Plant Signaling & Behavior*, 19(1), p.2365576.
- He L., Zhong H., Liu G., Dai Z., Brookes P. C., Xu J., et al. 2019. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: mechanisms, potential risks and applications in china. *Environmental Pollution*. 252: 846-855.
- Hong Y.K., Kim J.W., Lee S.P., Yang J.E. and Kim S.C. 2022. Effect of combined soil amendment on immobilization of bioavailable As and Pb in paddy soil. *Toxics*, 10(2), p.90.
- Houssou A.A., Jeyakumar P., Niazi N.K., Van Zwieten L., Li X., Huang L., Wei L., Zheng X., Huang Q., Huang Y. and Huang X. 2022. Biochar and soil properties limit the phytoavailability of lead and cadmium by Brassica chinensis L. in contaminated soils. *Biochar*, 4(1), p.5.
- Hseu Z.Y., Chen Z.S., Tsai C.C., Tsui C.C., Cheng S.F., Liu C.L. and Lin H.T. 2002. Digestion methods for total heavy metals in sediments and soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 141: 189-205.
- Irshad M.K., Ibrahim M., Noman A., Shang J., Mahmood A., Mubashir M., Khoo K.S., Ng H.S. and Show P.L. 2022. Elucidating the impact of goethite-modified biochar on arsenic mobility, bioaccumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) along with soil enzyme activities. *Process Safety and Environmental Protection*, 160: 958-967.
- Jackson M.L. 1973. Soil Chemical Analysis. Prentice Hall of India Private Limited, New Delhi.
- Jia Z., Giehl R.F. and von Wirén N. 2022. Nutrient-hormone relations: Driving root plasticity in plants. *Molecular Plant*, 15(1): 86-103.

- Johnson J.L., and Temple K.L. 1964. Some variables affecting the measurement of catalase activity in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 28 (2): 207–209.
- Kanwal A., Farhan M., Sharif F., Hayyat M.U., Shahzad L. and Ghafoor G.Z. 2020. Effect of industrial wastewater on wheat germination, growth, yield, nutrients and bioaccumulation of lead. *Scientific Reports*, 10(1), p.11361.
- Karimi A. and Khodaverdiloo H. 2014. Soil biological quality as influenced by lead (Pb) contamination under *Centaurea (Centaurea cyanus)* vegetation. *Soil Management and Sustainable Production*, 4(1): 127-143.
- Karlsson T, Elgh-Dalgren K, Björn E, Skjellberg U. 2007. Complexation of cadmium to sulfur and oxygen functional groups in an organic soil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 71:604–614.
- Kastori R., Petrović M. and Petrović, N. 1992. Effect of excess lead, cadmium, copper, and zinc on water relations in sunflower. *Journal of Plant Nutrition*, 15(11): 2427-2439.
- Khan M.A., Ding X., Khan S., Brusseau M.L., Khan A. and Nawab J. 2018. The influence of various organic amendments on the bioavailability and plant uptake of cadmium present in mine-degraded soil. *Science of the Total Environment*, 636: 810-817.
- Li S., Li Z., Feng X., Zhou F., Wang J. and Li Y. 2021. Effects of biochar additions on the soil chemical properties, bacterial community structure and rape growth in an acid purple soil. *Plant, Soil & Environment*, 67(3).
- Liang G., Li S., Yu X., Bu Q., Qu H., Zhu H., Yao X., Lu A. and Gong W. 2022. Black carbon-mediated degradation of organic pollutants: A critical review. *Process Safety and Environmental Protection*, 160: 610-619.
- Lin H., Liu C., Li B. and Dong Y. 2021. *Trifolium repens* L. regulated phytoremediation of heavy metal contaminated soil by promoting soil enzyme activities and beneficial rhizosphere associated microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, 402, p.123829.
- Lindsay W.L. and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science*, 42: 421–428.
- Liu S., Yang B., Liang Y., Xiao Y., and Fang J. 2020. Prospect of phytoremediation combined with other approaches for remediation of heavy metal-polluted soils. *Environmental Science and Pollution Research*. 27: 16069–16085.
- Long CM, Nascarella MA, Valberg PA. 2013. Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions. *Environmental Pollution*, 181:271–86.
- Mazaheri-Tirani M., Parsa Motlagh B., Ahmadzadeh M., Seyedi, A. 2024. Mitigating pb toxicity in *Sesbania sesban* L. through activated charcoal supplementation: a hydroponic study on enhanced phytoremediation. *BMC Plant Biology*, 24(1), 744.
- Medalia AI, Rivin D, Sanders DR. 1983. A comparison of carbon black with soot. *Science of the Total Environment*, 31(1):1–22.
- Mishra S., Srivastava S., Tripathi R.D., Kumar R., Seth C.S. and Gupta D.K. 2006. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation. *Chemosphere*, 65(6): 1027-1039.
- Nannipieri P., Ascher J., Ceccherini M., Landi L., Pietramellara G. and Renella G. 2017. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 68(1): 12-26.
- Nelson D.W. & L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Book Series, Number 5, Madison, WI: 961–1010.
- Palansooriya K.N., Shaheen S.M., Chen S.S., Tsang D.C., Hashimoto Y., Hou D., Bolan N.S., Rinklebe J. and Ok Y.S. 2020. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environment International*, 134, p.105046.
- Pan H., Yang X., Chen H., Sarkar B., Bolan N., Shaheen S.M., Wu F., Che L., Ma Y., Rinklebe J. and Wang H. 2021. Pristine and iron-engineered animal-and plant-derived biochars enhanced bacterial abundance and immobilized arsenic and lead in a contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 763, p.144218.

- Phaniendra A., Jestadi D.B. and Periyasamy L. 2015. Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 30: 11-26.
- Premalatha R.P., Poorna Bindu J., Nivetha E., Malarvizhi P., Manorama K., Parameswari E. and Davamani V. 2023. A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. *Frontiers in Energy Research*, 11, p.1092637.
- Rađenović A. and Malina J. 2013. Adsorption ability of the carbon black for nickel ions uptake from aqueous solution. *Hemjska Industrija*, 67(1): 51-58.
- Rahman S.U., Qin A., Zain M., Mushtaq Z., Mehmood F., Riaz L., Naveed S., Ansari M.J., Saeed M., Ahma I. and Shehzad M. 2024. Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon*.
- Raj K. and Das A.P. 2023. Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5: 79-85.
- Shakoori M., Babaakbari M., Abdoos S., Hassani, A. 2021. Effect of some chitosan-coated mineral amendments on lead uptake and growth characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Applied Soil Research*, 9(3): 89-103. (In Persian)
- Shu K., Zhou W., and Yang W. 2018. APETALA 2-domain-containing transcription factors: focusing on abscisic acid and gibberellins antagonism. *New Phytologist*. 217: 977-983.
- Sobolev D. and Begonia M.F. 2008. Effects of heavy metal contamination upon soil microbes: lead-induced changes in general and denitrifying microbial communities as evidenced by molecular markers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 5(5): 450-456.
- Stevens R.G., Creissen G.P. and Mullineaux P.M. 1997. Cloning and characterisation of a cytosolic glutathione reductase cDNA from pea (*Pisum sativum* L.) and its expression in response to stress. *Plant Molecular Biology*, 35: 641-654.
- Sun X., Sun M., Chao Y., Shang X., Wang H., Pan H., Yang Q., Lou Y. and Zhuge Y. 2023. Effects of lead pollution on soil microbial community diversity and biomass and on invertase activity. *Soil Ecology Letters*, 5(1): 118-127.
- Tafvizi M., Motesharezadeh B. 2014. Effects of lead on iron, manganese, and zinc concentrations in different varieties of maize (*Zea mays*). *Communications in soil science and plant analysis*, 45(14): 1853-1865.
- Verma S. and Dubey R.S. 2003. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, 164(4): 645-655.
- Wan Y., Devereux R., George S.E., Chen J., Gao B., Noerpel M. and Scheckel K. 2022. Interactive effects of biochar amendment and lead toxicity on soil microbial community. *Journal of Hazardous Materials*, 425, p.127921.
- Xiao R., Wang P., Mi S., Ali A., Liu X., Li Y., Guan W., Li R. and Zhang Z. 2019. Effects of crop straw and its derived biochar on the mobility and bioavailability in Cd and Zn in two smelter-contaminated alkaline soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 181: 155-163.
- Xu Y., Seshadri B., Bolan N., Sarkar B., Ok Y.S., Zhang W., Rumpel C., Sparks D., Farrell M., Hall T. and Dong Z. 2019. Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals. *Environment International*, 125: 478-488.
- Xu Y., Seshadri B., Sarkar B., Wang H., Rumpel C., Sparks D., Farrell M., Hall T., Yang X. and Bolan N. 2018. Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil. *Science of the Total Environment*, 621: 148-159.
- Yoon J., Cao X., Zhou Q., Ma, L. Q. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the total environment*, 368(2-3): 456-464.
- Zhang F. P., Li C. F., Tong L. G., Yue L. X., Li P., Ciren Y. J., and Cao C. G. 2010. Response of microbial characteristics to heavy metal pollution of mining soils in central Tibet, China. *Applied Soil Ecology*, 45(3): 144-151.
- Zulfiqar U., Farooq M., Hussain S., Maqsood M., Hussain M., Ishfaq M., Ahmad M. and Anjum M.Z. 2019. Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. *Journal of Environmental Management*, 250, p.109557.